

物流施設最適立地問題に関する研究

小杉 雅 敬

1. はじめに

この数年来、経済の低成長が続くなかで、物流部門のウエイトが高い企業では利益確保のため物流費用の低減をめざし、流通センターの新設やそれともなう物流ネットワークの改善などが行なわれている。

物流費用はその性質の違いから、物流施設コストと輸送・配送コストに大きく分類できる。ここで前者は物流施設を集約統合したほうがコストを低減でき、それに対して後者は物流施設を多く分散したほうがコストを低減できるという相反する関係にある。最適な物流施設計画はその両者の和を最小化するものでなければならない。この一方のコストを最小化することは比較的簡単であるが、両者の和を最小化することはきわめてむずかしい。

理論的にはこの両コストの和の最小化問題を混合整数計画法により解くことができるが、より現実的な問題、すなわち多くのノードや非線形コスト関数を含んだ問題を解くのは、超高性能大型計算機を利用しても膨大な計算時間を要するため事実上不可能に近い。

ところで、多大な投資をとまらう物流改善計画が実施された場合、それが最適計画でなければ長期にわたり機会損失が発生することになるし、その最適計画が発見できなければその機会損失の大きさについてさえ認識できないことになる。たとえ実施後、最適計画が発見できたとしても、初期投資額の大半は建設費であるため、計画変更すれば多大な損失が発生することになる。以上のことから物流改善のためには、事前に最適計画を発見することが重要であると考えられる。

そこで大成建設¹⁾では物流施設コストと輸送・配送コストの和を同時に最小化するプログラム、TDFLP-1 (Taisei Distribution Facilities Location Problem-1)を開発した。当プログラムは、

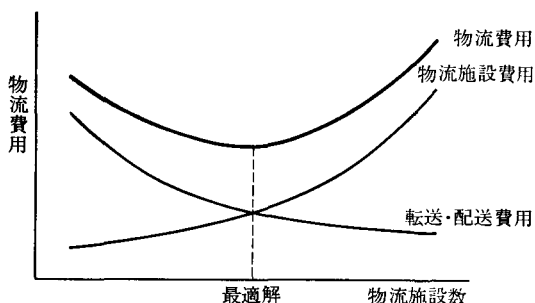


図 1 物流施設費用と輸送・配送費用の関係

- 工場から物流施設までの輸送コスト
- 在庫をもつ物流施設のコスト
- 物流施設から積替基地までの輸送コスト
- 在庫をもたない積替基地のコスト
- 配送先までの配送コスト

の合計を最小化することを解くことができ、その結果、

- 物流施設の立地場所と規模
- 積替基地の立地場所と規模
- 輸送ネットワークと配送エリア

の最適解が得られる。

当プログラムの特徴は、各施設の規模に対するコスト関数を非線形で与えることができ、また固定費をもった既存施設の選択も可能であるという点にある。さらに計算速度がきわめて早いため、ノード数の多い問題でも通常の大型計算機で解けるという大きなメリットがある。

大成建設¹⁾では、この TDFLP-1 を駆使することにより、製造業、輸送業などの各社の物流施設立地計画に協力している。また、当プログラムは通常の物流施設のみならず工場、エネルギー施設、廃棄物処理施設などの最適立地問題をも解くことができ、その応用範囲は広い。

2. コストダウンと物流部門

資本主義社会では当然のことながら、企業の第1目標

こすぎ まさのり 大成建設 技術開発部

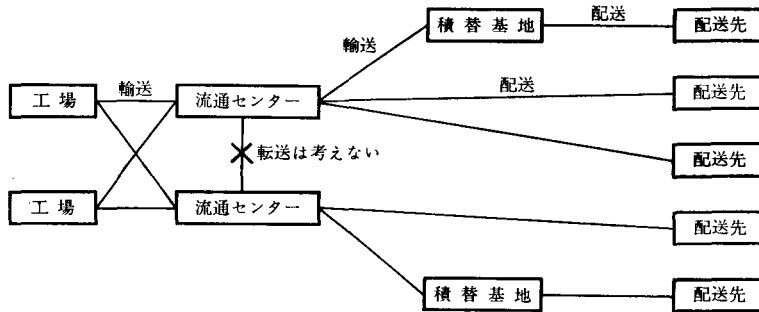


図2 物流構造

は利益追求である。この目標を達成する戦略には、販売量の拡大、商品(製品)の高付加価値化、コストダウンの3つがある。これはあくまでも一般論ではあるが、時代的にはその戦略のウェイトが前者から後者へ移りつつある。

時代： 高度成長期前半⇒高度成長期後半⇒低成長期
 戦略： 販売量拡大 高付加価値化 コストダウン
 戦術： 大量生産 商品開発 原価管理

メーカー系流通業では、高度成長期前半は消費の急速な伸びにともない、大量生産ラインの導入が可能となり、このことがコストダウンを促進したために、販売量を急速に拡大してゆくことができた。しかし高度成長期が進むにつれて、市場では商品が飽和状態に達してきた。そこで、新商品開発による販売量の拡大や高付加価値化の戦略がとられるようになった。その結果、企業間の競争激化を招来したためにあまり高付加価値化は達成できず、消費の多様化をみちびき、商品の多品種化やライフサイクルの短縮化を促進した。

このような状況の中で低成長時代がおとずれ、消費の伸びが低迷するようになり、各産業の売上げも横這い傾向に転じた。ここで利益を確保してゆくためには、コストダウンが重要な課題となっており、現代は原価管理の時代といわれている。

さて、コストダウンの対象として、生産部門は多品種少量生産やライフサイクルの短縮化のために、また販売部門は熾烈な販売競争のためにその達成はむずかしくなっている。そこで、物流部門におけるコストダウンの要請が高まりつつある。

3. 物流改善と施設立地

全国メーカー系流通業は、高度成長期にその販売量を急速に拡大していったが、それにともない工場、倉庫、配送センターなどの施設も事後的に建設されていった。この時代は全体的な物流効率上、各種施設立地の計画的でない点や分散型で多少ムダな面があっても、その問題

点が顕在化しないほど売上げや利益の伸びがあった。しかし、現在は物流コスト低減のために各施設の再配置を検討すべき時期にきていると考えられる。

また、高度成長期は物価上昇率が高かったこともあり、在庫問題はそれほど重要視されていなかったが、近年低成長期に入り金利負担や保管費用の軽減のために在庫圧縮は重要な課題となっている。

特に物流施設での在庫圧縮は分散した物流施設を集約統合化すれば、ある程度達成できるし在庫管理や情報管理上も好ましい。物流施設の規模がある程度大きくなれば、ハンドリングなどの自動化が可能となり、その他の規模のメリットもはたらいて物流施設の運営・管理費用を低減できる。また、物流施設間の転送費用も発生しなくなる。

この在庫圧縮は流通業の配送先である卸売業や小売業でも実施されているため、配送量は小口化し配送頻度は高まる傾向にあり、サービス性の要求も強くなっている。これが流通業の配送コストをアップする要因となっており、そのためにも物流施設の再配置や統合を行わない、物流ネットワークを改善する必要性がでてきている。

一般的には以上のような観点から、物流部門のウェイトの高い業界では在庫圧縮、情報管理の向上、物流費用削減などを目的として、既存の物流施設を自動化した新規流通センターに集約統合化し、また遠隔地に対しては無在庫積替基地を配置するというような物流改善計画が着実に進められている。

4. 物流施設最適立地問題の設定

モデルの定式化を行なうために、最適立地問題の前提条件を以下のように設定した。

- ① 物流構造は工場、流通センター、無在庫積替立地、配送先の4段階から構成されているものとする。
- ② 各工場ごとに生産される品種が異なっているものとし、各流通センターは在庫をもち全品種揃えているものとする。

のとする。そこで、各流通センターへは各工場の生産量に比例して輸送される。

- ③ 流通センター候補地には新規のものと既設のものがあり、敷地や施設の制約によりそれぞれ物流量の上限がある場合もある。
- ④ 新規流通センターについてはその物流量に適合した規模を設定し、そのときの施設費用を算出するものとする。この場合流通センターは規模のメリットが働くため、物流量に対する施設費用関数は非線形とする。
- ⑤ 既設流通センターの費用関数は固定費と変動費に分けられ、変動費関数は非線形とする。ここで流通センターを閉鎖し除却する場合は固定費が発生しないものとする。
- ⑥ 積替基地へは流通センターのみから輸送され、輸送効率上積替基地の物流量には下限を与え、かつ上限を与える場合もある。また、その費用関数は非線形である。
- ⑦ 各配送先へは流通センターと積替基地から配送される。
- ⑧ 各施設間の製品1単位当りの輸送・配送費用はそれぞれ異なっている。

5. モデルの定式化

5.1 変数とパラメータ

K : 工場数

L_1 : 新規流通センター候補地数

L_2 : 既設流通センター候補地数

M : 積替基地候補地数

N : 配送先数

X_{kl} : 工場 k から流通センター l への輸送量

Y_{lmn} : 流通センター l から積替基地 m を通って配送先 n までの輸送量

S_k : 工場 k の供給量

D_n : 配送先 n の需要量

DC_l : 流通センター l の物流量

DC^*_l : 流通センター l の最大可能物流量

DP_m : 積替基地 m の物流量

DP^*_m : 積替基地 m の最大可能物流量

DP^{**}_m : 積替基地 m の物流量下限値

FC_{kl} : 工場 k から流通センター l への輸送単価

CD_{lm} : 流通センター l から積替基地 m への輸送単価

DS_{mn} : 積替基地 m から配送先 n への輸送単価

$CC_l(DC_l)$: 物流量 DC_l に対する新規流通センターの費用関数

$V_l(DC_l)$: 物流量 DC_l に対する既設流通センターの変動費用関数

FX_l : 既設流通センター l の固定費

Z_l : 既設流通センター l を閉鎖するかどうかを表わす 0-1 型整数変数

$CP_m(DP_m)$: 物流量 DP_m の場合の積替基地 m の費用関数

5.2 制約条件

$$\sum_{l \in L_1} X_{kl} + \sum_{l \in L_2} X_{kl} \leq S_k \quad k=1, \dots, K \quad (1)$$

$$DC_l = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N Y_{lmn} = \sum_{k=1}^K X_{kl} \quad l \in L_1, L_2 \quad (2)$$

$$DC_l \leq DC^*_l \quad l \in L_1, L_2 \quad (3)$$

$$DP_m = \sum_{l \in L_1, L_2} \sum_{n=1}^N Y_{lmn} \quad m=1, \dots, M \quad (4)$$

$$DP^{**}_m \leq DP_m \leq DP^*_m \quad m=1, \dots, M \quad (5)$$

$$D_n = \sum_{l \in L_1, L_2} \sum_{m=1}^M Y_{lmn} \quad n=1, \dots, N \quad (6)$$

$$Z_l: DC_l = 0 \rightarrow 0, DC_l > 0 \rightarrow 1 \quad l \in L_2 \quad (7)$$

$$X_{kl} \geq 0, Y_{lmn} \geq 0 \quad (8)$$

$$X_{kl} = S_k \cdot DC_l / \sum_{l \in L_1, L_2} DC_l \quad (9)$$

5.3 目的関数

$$TC = \sum_{k=1}^K \sum_{l \in L_1, L_2} FC_{kl} \cdot X_{kl} + \sum_{l \in L_1, L_2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (CD_{lm} + DS_{mn}) \cdot Y_{lmn} + \sum_{l \in L_1} CC_l(DC_l) + \sum_{l \in L_2} V_l(DC_l) + \sum_{l \in L_2} FX_l \cdot Z_l + \sum_{m=1}^M CP_m(DP_m) \quad (10)$$

5.4 モデルの説明

式(1)は工場 k から供給できる製品の量が、全流通センターへの輸送量の和より等しいか大きくなければならぬことを示す。式(2)は流通センター l に入ってくる製品の総量が、そこから出てゆく製品の総量に等しいことを示し、式(3)はその総量が上限値を越えないことを示している。式(4)は積替基地の物流量であり、式(5)はその物流量には上限値と下限値があることを示している。また、式(6)は配送先 n に配送される総量が、その需要量を満たしていることを示している。

さらに、式(7)は流通センター l の物流量がない場合は0、物流量がある場合は1となる整数変数を示す。式(8)は各輸送・配送量が負ではないことを示している。式(9)は各工場で生産される製品が異なっているため、各流通センターへ各工場から輸送される量の比率は等しいことを示している。

目的関数の式(10)は、工場・流通センター間輸送費、流通センター・積替基地間輸送費と積替基地・配送先間輸送費、新規流通センターの非線形費用関数、既設流通センターの非線形変動費用関数と物流量がない場合は発生しない固定費、積替基地の非線形費用関数から構成されるトータル物流費用 TC で表わしている。

この立地問題は式(1)から(9)の制約条件のもとで、目

的関数(10)を最小にする実数変数 X_{kl} , Y_{lmn} および整数変数 Z_l を求めることである。

6. 解法の基本的な考え方

定式化モデルは非線形関数を含んだ混合整数計画問題であり、現在まで最適解を得る合理的なアルゴリズムは完成されていない。そこで heuristic な方法に頼らざるをえない。ここではポーモル・ウォルフ・モデル(W. J. Baumol & P. Wolf) [1] の収束計算の手順をベースにして、より現実的な問題に適用できるように展開し、さらに、効率的に最適解を発見する方法を考案した。

ポーモル・ウォルフ・モデルは工場、倉庫、配送先の3段階のノードから構成されており、その計算手順は次のようになっている。

- ① 工場・配送先相互間の輸送費を最小とする倉庫を選定し、その場合の工場・配送先間輸送費マトリックスを作成する。
- ② この工場・配送先間輸送費マトリックスから、各配送先へはどの工場からどの倉庫を経由して輸送すればトータルコストが最小となるかを決定する。これはヒッチコックの輸送型問題を解くことと同じである。
- ③ その結果から各倉庫の物流量を算出し、そのときの倉庫の限界費用を計算する。
- ④ この限界費用を工場倉庫間輸送費に加算し、①と同様に工場・配送先間輸送費マトリックスを作成する。
- ⑤ その後で再度②～④のステップを繰り返し、その過程で倉庫の物流量が変化しなくなった場合に最適解が得られたことになる。

この計算過程では任意の物流量に対する倉庫の限界費用を輸送費に加算しているが、それはトータルコストがより小さくなる方向へ輸送ルートを変更することを意味している。ただし、倉庫費用の微分値である限界費用を用いているということは、固定費を含んだ問題の場合トータルコストの最小化に固定費が反映されないことになる。すなわち、固定費を含んだ任意の施設を計算のインプット条件から外すことにより、トータルコストが低減する場合もあるため、必ずしも最適解を保証していないことになる。

ここでいう固定費とは、施設が利用されないときは発生せず、利用されるときは施設の稼働状況にかかわらず一定して発生する費用である。よって、固定費は既存の立地している施設や建設規模が限定されている施設の費用に含まれることになる。ただし、まだ建設されていない施設については、必要に応じて適切な規模の施設が建設可能であるとすれば、固定費も変動することになり、施設費用はすべ

して変動費と考えることができる。

これに対して、筆者はこの限界費用の代りに、倉庫の物流量で固定費も含んだ施設費用を除いた値、すなわち製品1単位当りの倉庫費用を用いて、ポーモル・ウォルフ・モデルと同様の収束計算を行えば採用すべき倉庫を決定できることを発見した。

ただし、その計算結果はまだ最適性を保証していない。そこで、採用された倉庫のみで再度限界費用を用いてポーモル・ウォルフ・モデルと同様の計算を行なうことになる。この計算結果は、倉庫群のあらゆる可能な組合せについて得られた最適解の中で、最小コストであることを示していた。以上のような2回のステップで最適解が得られるということの理論的な証明はまだ行なっていないが、前提条件を変えた数回のケース・スタディでは安定して最適解が得られている。

限界費用を用いて計算するということは、既存の倉庫群の中で地域的な需要分布が変化したときや総需要が伸びて倉庫を新設するとき、各施設を閉鎖除却することは特に考えず、固定費を外した物流費用を最小化するように、倉庫の物流量を再配分する場合に適している。すなわち、部分的な改善計画の最適解が得られることになる。

一方、物流量当りの倉庫費用を用いる意味は、収束過程で総物流費用を低減する方向へ配送ルートを変更するのではなく、稼働率の低い倉庫を棄却する方向へ収束するということになる。この費用は、限界費用と比較して物流量に対する変化が急勾配であるため、稼働の低い倉庫は急速に棄却される傾向がある。

そこで、筆者の考案した方法は物流施設の新規候補地や既存施設を含めて、大幅な統廃合をとまなう全体的な物流改善計画を行なう場合に適している。

7. ケース・スタディ

7.1 概要

このケース・スタディは、架空のインプット条件を設定して、TDFLP-1を用いて最適解を求めたものである。その物流構造は、5カ所の工場から4カ所の流通センター候補地に製品を輸送し、次に6カ所の積替基地候補地に輸送し、その流通センターまたは積替基地から136カ所の配送先に配送するものとした。ここで、流通センターには新規候補地と既設のものをそれぞれ2カ所設定し、流通センターとして採用されなかった場合は積替基地の候補地とした。

ここではまず最適解を求め、他に各候補地の組合せを変えたケースについても計算を行なった結果、その最適性は証明された。

この最適解を得るのに要する計算時間は、各種費用を変えた数回のケース・スタディでも、IBM3033で10秒以内であった。さらに、流通センター数10カ所、積替基地数20カ所、配送先337カ所の各種ケースについても、最適解は20~50秒程度で得られている。

7.2 インプット条件

① 工場所在地とその出荷量

工場	出荷量/月	構成比(%)
川崎	200,000	40
大阪	100,000	20
名古屋	100,000	20
静岡	50,000	10
栃木	50,000	10
計	500,000	100

② 流通センター候補地と月間費用関数

- 既設流通センター……船橋, 海老名(図3)

最大可能物流量	100,000	数量/月
固定費	6,000,000	円/月
変動費	$5,000 \cdot (\text{物流量/月})^{0.6}$	円/月
限界費用	$3,000 \cdot (\text{物流量/月})^{-0.4}$	円/月

- 新規流通センター……川崎, 志木(図4)

最大可能物流量	川崎	500,000	数量/月
	志木	300,000	数量/月
固定費+変動費	$3,800 \cdot (\text{物流量/月})^{0.7}$	円/月	
限界費用	$2,600 \cdot (\text{物流量/月})^{-0.3}$	円/月	

③ 積替基地候補地と月間費用関数(図5)

千葉, 松戸, 大宮, 立川, 鎌倉
流通センター候補地も流通センターとして採用されない場合は、積替基地候補地とする。

最小物流量	10,000	数量/月
施設費用	$100 \cdot (\text{物流量/月})^{0.8}$	円/月
限界費用	$80 \cdot (\text{物流量/月})^{-0.2}$	円/月

④ 配送先

月間総需要量 500,000 数量/月
東京都, 千葉県, 埼玉県, 神奈川県のおよび区136カ所の人口に比例して配分した。

⑤ 工場・流通センター間輸送費

川崎	30円/数量
船橋	43円/数量
志木	42円/数量
海老名	41円/数量

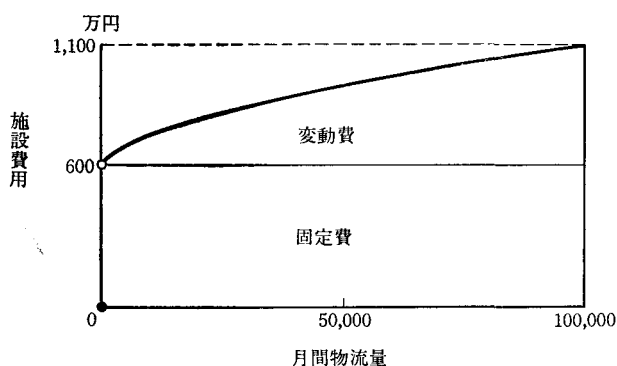


図3 既設流通センターの費用関数

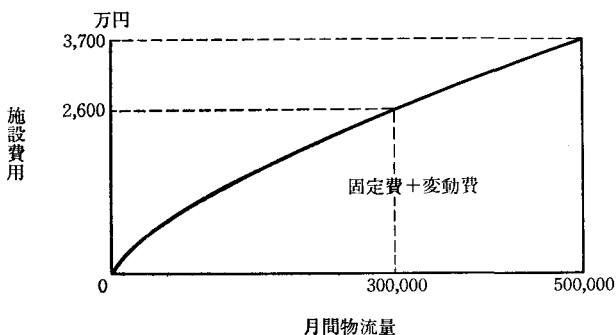


図4 新規流通センターの費用関数

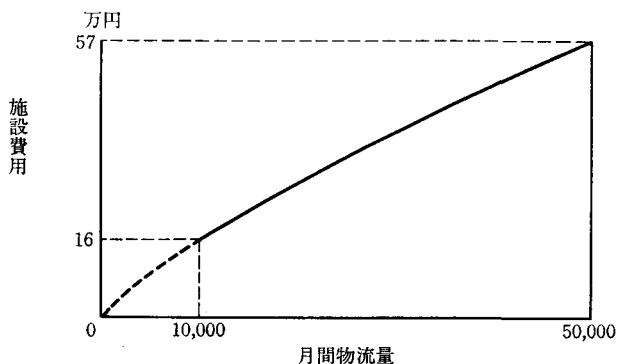


図5 積替施設の費用関数

各工場で生産される製品はそれぞれ異なっているものとする。そこで、各流通センターへは工場の出荷量に比例して輸送されることになり、その輸送費は各流通センターについて一意的に決まる。

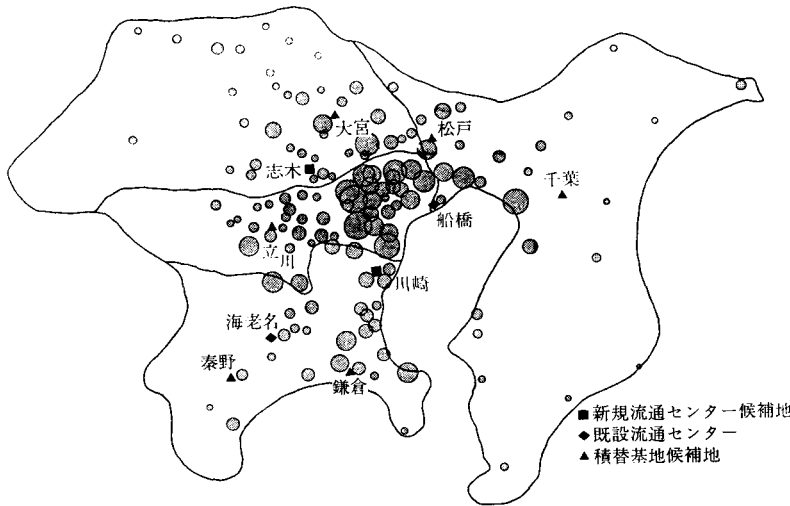


図 6 物流施設候補地と需要分布

⑥ 流通センター・積替基地間輸送費(円/数量)

流通センター	川崎	船橋	志木	海老名
川崎	0	43	44	44
船橋	43	0	44	47
志木	44	44	0	45
海老名	44	47	45	0
千葉	47	44	48	51
松戸	45	42	44	48
大宮	45	44	42	47
立川	44	45	42	43
鎌倉	43	46	46	42
秦野	46	48	47	42

⑦ 積替基地・配送先間配送費

ここでは、積替基地・配送先間距離は地図上から直線距離で測定し、遠隔地は積載効率の低下や時間制限を考慮して配送費を高目に設定した。

料程	配送費(円/数量)
1 km	51.0
5 km	55.5
10km	62.0
20km	78.0
30km	98.0
40km	122.0
50km	150.0

7.3 最適化計算の結果

このケース・スタディでは、流通センターを川崎に新設した1拠点計画が最適解であり、このとき6カ所の積替基地が選ばれていた。ここでは、さらに流通センターの組合せを変えた数ケースの最適解も求めてみた。ただし、これは各流通センター物流量に上限を与えた制約条件付き最適解である。

その結果、インプット条件はあくまでも架空のデータではあるが、流通センター数が多いほうが施設費用は増加し、逆に輸送・配送費用は減少する傾向が表われている。また、ケース7の流通センター4拠点計画は従来の物流構造に近いものであると考えられ、ケース1の最適解と比較すると総物流費用は10%高くなっていた。

8. おわりに

前述したように、物流量当りの施設費用を用いて採用すべき施設を選定できるということが、数回のケース・スタディでは証明されているが、さらに実証的な研究を進めるとともに理論的な証明もする必要があると考える。

最後に、本研究を始めるに当り、貴重なご示唆をいただいた早稲田大学システム科学研究所の阿保栄司教授、現実の物流問題についてさまざまなご教示をいただいた

表 1 各ケースの流通施設の月間物流量(単位:千)

流通施設	ケース No.	月間物流量						
		1	2	3	4	5	6	7
流通センター	川崎	500	400	300	400	300		160
	船橋		100			100	100	100
	志木			200			300	140
	海老名				100	100	100	100
積替基地	川崎							
	船橋							
	志木	15	15		19	19		
	海老名							
	千葉	39	22	39	39	22	20	20
	松戸	23		10	23			
	大宮	41	41		41	41		
	立川	20	20					
鎌倉	14	14	14					
秦野								

森永製菓㈱の三宅雅彦取締役と物流部の方々、また研究中暖かく見守っていただいた職場の方々に深く感謝の意を表します。

今後とも先輩諸氏のご意見、ご批判を仰ぎ、本研究をさらに進めてゆきたいと考えております。

参考文献

- [1] 阿保栄司：物流ソフトウェアの実際，日刊工業新聞社，2.28(1977)
- [2] H.M.ワグナー：オペレーションズ・リサーチ入門2，培風館，11.10(1976)
- [3] 今野 浩：整数計画法，産業図書，7.13(1981)
- [4] R.J.シーロフ/R.A.グロス：オペレーションズ・リサーチ概論，日科技連，3.23(1981)

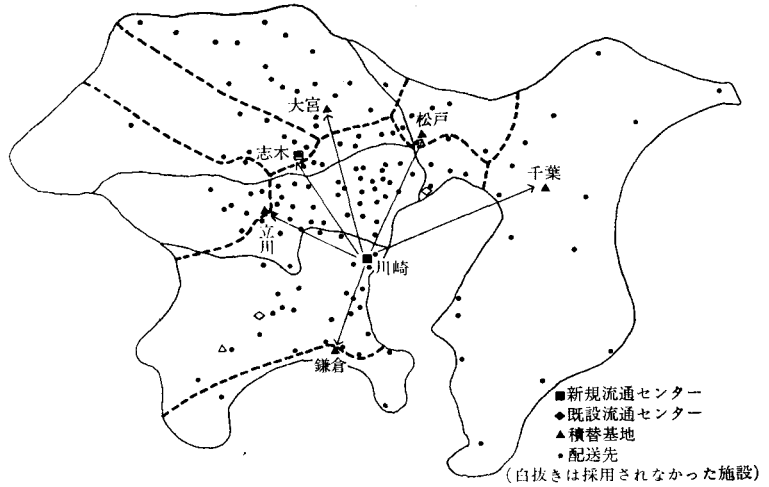


図7 ケース1(最適解)の物流施設と配送エリア

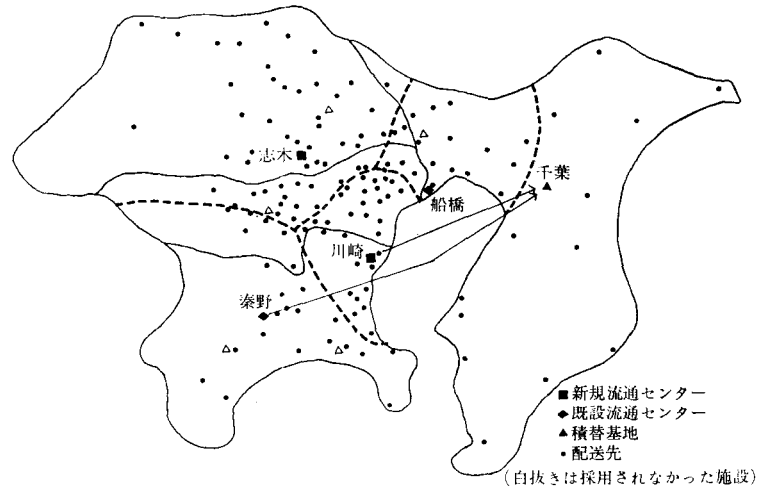


図8 ケース7の物流施設と配送エリア

表2 各ケースの月間物流費用(単位：千円)

ケースNo.		1	2	3	4	5	6	7
施設費用	流通センター	37,073	42,712	45,449	42,712	47,928	47,928	53,850
	積替基地	1,976	1,494	996	1,694	1,052	274	274
	小計	39,049	44,206	46,445	44,406	48,980	48,202	54,124
輸送・配送費用	工場・センター間	15,000	16,300	17,400	16,100	17,400	21,000	19,090
	センター・積替基地間	6,882	5,043	3,320	5,998	3,725	952	988
	配送費	41,706	40,410	40,138	40,833	40,105	39,730	38,502
	小計	63,588	61,753	60,858	62,931	61,230	61,682	58,580
物流費用		102,637	105,959	107,303	107,303	110,210	109,884	112,704
指数(ケース1=100)		100.0	103.2	104.5	104.6	107.4	107.1	109.8